

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Diagnostika statorových vinutí asynchronních motorů

Vedoucí práce: prof. Ing. Václav Mentlík, CSc.

Konzultant: Ing. Josef Krupička

Autor: Martin Macháček

2017

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Martin MACHÁČEK**
Osobní číslo: **E14B0038P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Diagnostika statorových vinutí asynchronních motorů**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Prostudujte a popište způsoby provedení statorového vinutí asynchronních motorů.
2. Uveďte materiálové aspekty a možnosti těchto vinutí.
3. Prostudujte a uveďte možnosti diagnostiky jednotlivých etap výroby cívek pro statorová vinutí asynchronních motorů.
4. Na základě zjištěných skutečností navrhnete diagnostický systém pro statorová vinutí asynchronních motorů.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Mentlík, V., et.all: Diagnostika elektrických zařízení, BEN Praha 2008.

2. Normativy týkající se vinutí asynchronních motorů.

Vedoucí bakalářské práce: **Prof. Ing. Václav Mentlík, CSc.**


Katedra technologií a měření

Datum zadání bakalářské práce: **14. října 2016**

Termín odevzdání bakalářské práce: **8. června 2017**


Doc. Ing. Jiri Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kús, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2016

Abstrakt

Hlavním úkolem a současně námětem pro vznik této práce je návrh nového rázového generátoru. Tento generátor je součástí diagnostického systému, který dohlíží na správný průběh výroby cívek asynchronních motorů středních výkonů. Zadání pro návrh zmíněného diagnostického přístroje vychází z potřeb firmy Inelsev motory a.s. Samotná práce v závěru popisuje klíčové součásti tohoto zařízení. Vývoj zařízení probíhal přímo v areálu zadávající firmy v období od dubna do září roku 2016.

Dále jsou zde popsány základní konstrukční prvky asynchronního motoru. Zejména pak vlastnosti izolačního systému. Vyjmenovány jsou zde také základní způsoby provedení izolace elektrických strojů. Na základě popisu konstrukce asynchronního motoru a možností izolačních systémů, jsou následně popsány nejvhodnější diagnostické metody. Tyto metody byly voleny tak, aby objektivně stanovily stav jednotlivých prvků asynchronních motorů.

U jednotlivých diagnostických metod je vyhodnocen jejich potenciál pro diagnostiku jednotlivých cívek asynchronních motorů. Výsledkem je nový diagnostický systém s novým rázovým generátorem.

Klíčová slova

Asynchronní motor, izolační systém, vinutí, mezizávitová izolace, rázový generátor, diagnostika

Abstract

The main task and at the same time the theme for this work is the design of a new impact generator. This generator is part of a diagnostic system that monitors the correct course of production of coils of medium power asynchronous motors. The specification for the proposed diagnostic tool is based on the needs of Inelsev engines a.s. The very work in the end describes the key components of this device. The development of the equipment took place directly on the premises of the contracting company between April and September 2016.

The basic components of the asynchronous motor are also described here. There are also the basic methods of insulating electrical machines. Based on the description of the asynchronous engine design and the possibilities of the insulation systems, the most appropriate diagnostic methods are described. These methods were chosen to objectively state the state of individual elements of asynchronous motors.

The individual diagnostic methods evaluate their potential for diagnosing individual coils of asynchronous motors. The result is a new diagnostic system with a new impact generator.

Key words

Asynchronous motor, insulation system, winding, interturn insulation, impact generator, diagnostics

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou/bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské/diplomové práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 1.6.2017

Martin Macháček

Poděkování

V první řadě bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce prof. Ing. Václavu Metlíkovi, CSc za profesionální vedení a cenné rady.

Dále také děkuji mé rodině za podporu během studia. Zvláštní poděkování patří mému dědovi Václavu Schneiderovi, bez kterého bych se k elektrotechnice možná ani nedostal. Za duševní podporu děkuji kamarádům a známým z Radioklubu v Řevničově a Sboru dobrovolných hasičů ve Třeboci.

Poděkování patří také řediteli firmy Inelsev Motory a.s., Jiřímu Hanzalovi a vedoucímu oddělení zkušebny Ing. Josefu Krupičkovi, za podporu během vývoje rázového generátoru. Děkuji také technikům z dílny za výrobu mechanických částí a pracovnícům navijárny za poskytnutí materiálu.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
1 KONSTRUKCE ASYNCHRONNÍHO MOTORU	11
1.1 ZÁKLADNÍ POPIS.....	11
1.2 PROVEDENÍ STATOROVÉHO VINUTÍ	14
2 MATERIÁLOVÉ ASPEKTY	17
2.1 IZOLACE VODIČŮ	20
2.2 DRÁŽKOVÁ IZOLACE	21
2.3 IMPREGNACE.....	21
2.4 SYSTÉM RESIN-RICH	22
2.5 SYSTÉM VPI.....	22
3 DIAGNOSTICKÝ SYSTÉM	23
3.1 DIAGNOSTICKÁ MĚŘENÍ	24
3.1.1 <i>Odpor vinutí</i>	25
3.1.2 <i>Absorpční a resorpční charakteristiky</i>	26
3.1.3 <i>Ztrátový činitel</i>	28
3.1.4 <i>Napětíové zkoušky</i>	31
3.1.5 <i>Zkoušení mezizávitové izolace</i>	33
4 NÁVRH RÁZOVÉHO GENERÁTORU	35
4.1 STÁVAJÍCÍ RÁZOVÝ GENERÁTOR	36
4.2 NOVÝ RÁZOVÝ GENERÁTOR	37
4.2.1 <i>Rázový generátor - obecně</i>	37
4.2.2 <i>Zdroj pulzu</i>	38
4.2.3 <i>Spínač pulzu</i>	38
4.2.4 <i>Ovládání</i>	40
4.2.5 <i>Měřicí karta</i>	41
4.2.6 <i>Měřicí převodník</i>	41
ZÁVĚR	43
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	44

Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na popis běžného provedení statorových cívek, jakož i celého vinutí asynchronního motoru. Konkrétně se pak jedná o možné tvary cívek, používané materiály na vodiče a jejich izolaci. Také nastíní možnosti diagnostiky v průběhu výroby vinutí. Tato diagnostika bude vycházet z požadovaných vlastností vinutí stroje a umožní detekci možných chyb (zejména pak chyb izolačních systémů vinutí). Chyby statorových vinutí zkracují celkovou životnost motoru a způsobují tak mnohdy nemalé finanční ztráty. V některých fatálních případech pak chyby ohrožují zdraví a životy osob, které se pohybují v blízkosti asynchronních motorů.

Následně pak práce uvede možnou podobu diagnostického systému. Tento systém usnadní diagnostiku a umožní její provádění v běžných pracovních podmínkách dílen zajišťujících údržbu a opravy elektrických strojů. Hlavním prvkem nového diagnostického systému bude nový rázový generátor.

Samotný text práce je rozdělen do čtyř základních částí. První z těchto částí popisuje samotný asynchronní motor. Důraz je zde kladen zejména na konstrukční popis stroje. Druhá kapitola se pak zaměřuje konkrétně na izolační systémy asynchronních strojů. Popisuje materiálové možnosti izolačních materiálů. Další kapitola uvede do problematiky elektrotechnické diagnostiky. Z tohoto oboru následně vyjmenuje diagnostické metody použitelné pro efektivní stanovení stavu vinutí asynchronního motoru. Poslední kapitola je věnována popisu nejdůležitějších částí nového rázového generátoru, který tak vytvoří nový diagnostický systém.

Seznam symbolů a zkratek

E_P	Elektrická pevnost [$\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$]
I_A	Absorpční proud [A]
$I_{A\dot{C}}$	Činná složka absorpčního proudu [A]
I_{AJ}	Jalová složka absorpčního proudu [A]
I_C	Kapacitní proud [A]
I_{PR}	Prosakující proud [A]
p_{i1}	Minutový polarizační index [-]
p_{i10}	Desetiminutový polarizační index [-]
R_{VIN}	Odpor vinutí [Ω]
R_{IZ}	Izolační odpor [$M\Omega$]
$tg\delta$	Ztrátový činitel [-]
ε_o	Permitivita vakua [$\text{F}\cdot\text{m}^{-1}$]
ε_r	Relativní permitivita [-]
φ	Fázový posun [$^\circ$]
δ	Ztrátový úhel [$^\circ$]
ATR	Autotransformátor
DPS	Deska plošných spojů
L-ZK	Zkoušená cívka
NI	National instruments
PET	Polyethylentereftalát
RTE	Relativní index teplotní odolnosti
Rx	Měřený vzorek
USM	Usměrňovač
VN TR	Vysokonapěťový transformátor
VPI	Vakuově tlaková izolace
VYP	Vypínač

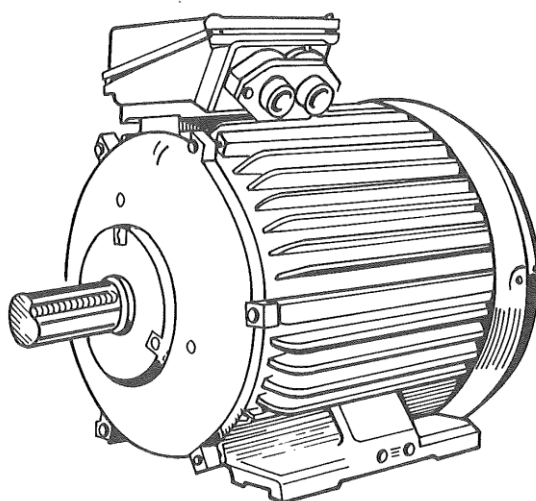
1 Konstrukce asynchronního motoru

Asynchronní motor je točivý elektrický stroj, jehož primární funkce je převádění elektrické energie na energii mechanickou. Energetický přenos je vlivem ztrát konán s nedokonalou účinností. Ztráty jsou způsobeny fyzikálními parametry použitých materiálů. Základem pro úspěšný návrh asynchronního motoru libovolného výkonu je stanovení jeho hlavních parametrů. S tím souvisí i důvod pro návrh stroje. Hlavními parametry je výstupní mechanický výkon, synchronní otáčky, napájecí napětí, konstrukční provedení (tvar motoru), krytí motoru a provedení chlazení. Z hlavních parametrů vycházíme při řešení konstrukce z hlediska elektrického i mechanického.

1.1 Základní popis

Samotný asynchronní motor se skládá ze dvou hlavních částí a to statoru a rotoru. Statorem v technické praxi rozumíme konstrukční část motoru, která se nepohybuje. Skládá se ze jha, paketu elektrotechnických plechů, samotného vinutí, dodatečné elektrické výzbroje a většinou jej uzavíráme ložiskovými štíty. Vinutí tvořené elektrickými vodiči, pokrytými izolací, zakládáme do drážek paketu elektrotechnických plechů. Plechy jsou vyráběny z křemíkové oceli. Se zvyšujícím se obsahem křemíku se snižují hysteretní ztráty a ztráty vířivými proudy. Tenčí plech vytvoří menší průřez, který znamená větší odpor a menší vířivé proudy. Vzájemně izolované plechy pak skládáme na sebe a vytváříme finální podobu paketu. Vinutí stroje vytváří v paketu magnetický tok a umožňuje tak jeho přechod do rotoru. Paket je poté zasunut do jha stroje, to zajišťuje paket proti pohybu vlivem reakčních sil a zároveň umožňuje odvod tepla z paketu do okolního prostředí. U menších strojů je jho většinou odlito, při čemž jsou na něm vytvořena žebra pro odvod tepla. U větších výkonů se můžeme setkat s více typy konstrukcí, vycházejících z konkrétního použití motoru (prašnost prostředí, nebezpečí výbuchu, poloha,...). Výjimky v konstrukci jha se objevují i u motorů malých výkonů. Součástí jha jsou svorkovnice a průchodky elektrických vodičů. Svorkovnice slouží k připojení motoru k napájecí a automatizační síti (v případě že je motor osazen čidly), zároveň pak svorkovnice zajišťuje potřebné krytí před vnikem pevných a kapalných částic. Motory pracující s vysokým napětím bývají vybaveny pouze průchodkami, někdy ukrytými pod poklapy. Dále jsou součástí statoru ložiskové štíty. Dříve se používaly též ložiskové stojany, kdy zůstal vnitřek

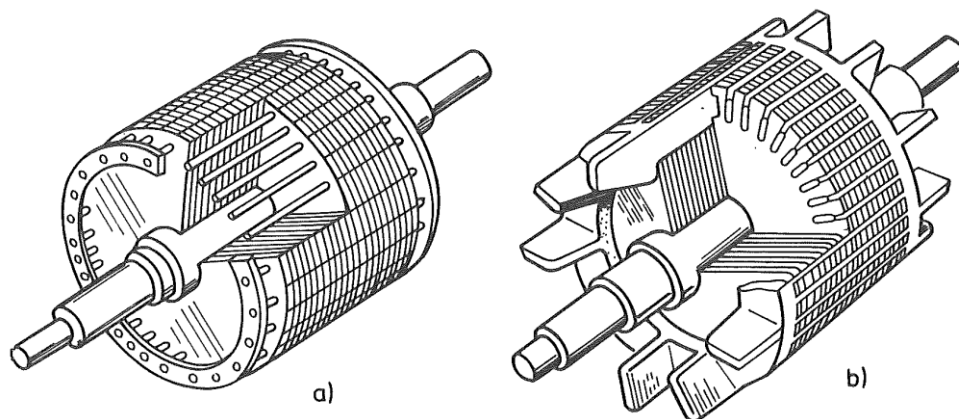
motoru otevřen pro lepší chlazení. V ložiskovém štítu, či stojanu se nachází ložisko. Používají se radiální valivá či kluzná ložiska, u motorů s vertikálním umístěním rotoru pak ložiska axiální. Ložiska upevňují rotor ve vymezeném prostoru a zároveň umožňují jeho rotační pohyb. U motorů menších výkonů (stovky kW) se používají valivá ložiska, u větších pak obvykle kluzná. Ložiskové štíty zároveň uzavírají prostor statoru a mohou na nich být umístěna např. rychlostní čidla a mazací trubičky. U motorů s kroužkovou kotvou jsou na ložiskovém štítu též uchyceny kartáče doléhající na kroužky rotoru.



obr. 1.1 Asynchronní motor, převzato z [3].

Druhou částí asynchronního motoru je rotor. Jednoduše řečeno se jedná o část motoru, která se otáčí. Skládá se z balení elektrotechnických plechů, rotorových tyčí s kruhy a hřídele. U motorů s kroužkovou kotvou jsou na hřídeli též umístěny kroužky s přírady z vinutí rotoru. V době frekvenčních měničů a polovodičových softstartérů začínají být však motory s kroužkovou kotvou zbytečné a proto se budeme věnovat hlavně motorům s kotvou nakrátko. Balení elektrotechnických plechů je obdobné balení statorovému. Rotorové tyče jsou podobné vinutí statoru. Rozdíl je v tom, že ve vinutí statoru se nachází v jedné drážce obvykle několik navzájem oddělených vodičů. U rotoru je v drážce obvykle pouze jeden vodič s velkým průřezem, proto jej nazýváme tyč. Tyčemi prochází rotorový proud, který vzniká elektrickou indukci od magnetického toku vznikajícího ve statoru. Velikost proudu je závislá na aktuálním skluzu motoru, vždy je však několikanásobně větší v porovnání s proudem procházejícím vinutím statoru. Tok tohoto proudu je umožněn uzavřením obvodu přes rotorové kruhy, které se nacházejí na koncích samotných rotorových tyčí. Všechny

tyče spojené kruhy pak nazýváme klec. Jak tyče, tak kruhy jsou nejčastěji z hliníku nebo mědi. V případě hliníku se jedná o jeho tlakové lití do drážek vytvořených v paketu elektrotechnických plechů. Při lití se vytvoří i lopatky vnitřní ventilace a výstupky umožňující vyvážení. Hliník používáme u motorů s menšími výkony. Tyče z mědi jsou vytvarovány předem a vkládány do paketu.

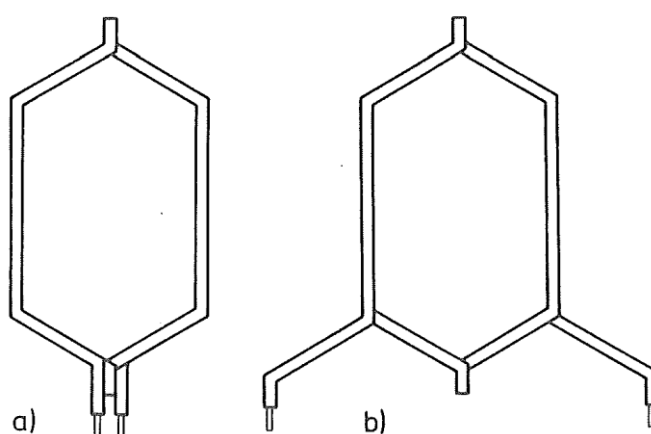


obr. 1.2 Rotor asynchronního motoru s kotvou nakrátko, a) s natvrdo pájeným vinutím, b) s odlévaným vinutím, převzato z [3].

Konce tyčí jsou poté spojeny měděným kruhem, při čemž spoj musí být velmi odolný (svaření či tvrdé pájení). Kotva kroužková je též tvořena mědí, místo tyčí se však používá tenkých izolovaných drátů, které se vinou podobně jako statorové vinutí. Konce vinutí jsou poté vyvedeny na kroužky. Paket s tyčemi či vinutím nasazujeme na hřídel. Otočení paketu zabraňujeme pomocí pera, velmi těsného uložení, u velkých motorů pak pomocí dalších spojovacích součástí. Hřídel je obvykle vyrobena z oceli. Její průřez musí být takový, aby dokázala přenést mechanický výkon motoru bez poškození krutem. Zároveň se nesmí v běžných podmínkách prohýbat pod tíhou magnetického obvodu a vinutí rotoru. Při trvalém uskladnění se však doporučuje periodicky pootáčet hřídeli pro zmenšení jejího průhybu. Jak již bylo řečeno, hřídel je uchycena ke statorovému jhu pomocí ložisek. Mezi ložisky a hřídelí musí být dosaženo pevného uložení (ložiska se z tohoto důvodu nasazují za tepla). Na částech za ložisky, vně motoru je hřídel upravena tak, aby zde byla možná montáž hnaného soustrojí. Obvykle je soustrojí montováno pouze na jednu stranu motoru (označovanou jako „zadní strana“), na druhou stranu pak umísťujeme ventilátor (strana s ventilátorem je tedy „přední strana“). Ventilátor je obvykle odstředivý. Jeho lopatky ofoukávají žebrování jha statoru a zlepšují tak chlazení.

1.2 Provedení statorového vinutí

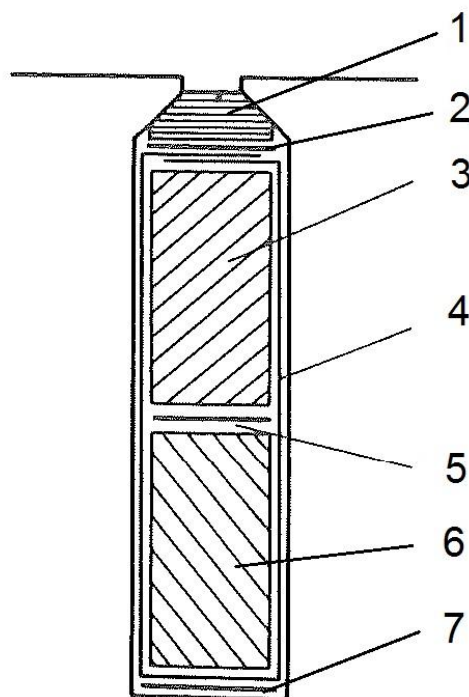
Jak již bylo řečeno stator je důležitou součástí asynchronního motoru. Obsahuje vinutí, které je u malých strojů tvořeno dráty s kruhovým průřezem o průměru řádově jednotek milimetru. Relativně tenké dráty umožňují použití drážky s úzkým hrdlem. Toto hrdlo pak zlepšuje přechod magnetického toku mezi státorem a rotorem a tím se zlepší průběh magnetické indukce. Hrdlo však musí být dostatečně široké, aby bylo možné vložit jednotlivé vodiče do drážky. Jednotlivé vodiče jsou lakovány vlastní izolací. Při samotném vkládání, častěji nazývaném jako vsypávání, nesmí být porušena vlastní izolace jednotlivých vodičů. Kromě samotných vodičů je v drážce umístěna dodatečná izolace, která tvoří vnitřní vyložení drážky. Touto izolací zajistíme dostatečnou izolační pevnost vodičů proti statorovému paketu (pakety jsou galvanicky propojeny s kostrou stroje). Pro zajištění vodičů v drážce umístíme v prostoru zahrnutí drážkový klín. Při navíjení strojů se vsypávaným vinutím nejprve navineme cívky o potřebném počtu závitů na přípravek s přesně daným geometrickým obvodem. Tento obvod je dán dvojnásobkem délky statorového paketu, také označovaného jako délka železa l_{FE} a jeho součtem s délkou dvou čel. U vyšších napěťových hladin se navíc doporučuje drážkové části prodloužit a nechat kousek cívky rovný. V místě ohybu se totiž zeslabuje izolace a v blízkosti drážky je navíc zvýšena intenzita elektrického pole. Vinutí jedné cívky zároveň musí prostupovat dvěma drážkami, které jsou propojeny předním a zadním čelem vinutí.



obr. 1.3 Cívky asynchronního motoru, a) smyčkové vinutí, b) vlnové vinutí, převzato z [3].

Čela vinutí jsou neaktivní část cívky a vytváří tak pouze Joulovy ztráty, tj. ztráty ohřevem vlivem procházejícího proudu. Je tedy nutné volit délku těchto čel co možná

nejmenší. Musíme však zohlednit potřebnou manipulaci a nutnost uchycení čel, aby se omezilo působení dynamického namáhání vlivem magnetického pole a dalšími mechanickými vlivy. Čela z tohoto důvodu svazujeme do speciálních svazků a podle typu svazku volíme potřebnou délku čela. Předem navinuté cívky pak obvykle ručně vkládáme do drážek statorového paketu, kde je zajišťujeme klíny. Následně svážeme a zajistíme čela vinutí. Při svazování čel vinutí spojujeme jednotlivé cívky do předem daných cívkových skupin a následně vyvedeme konce vinutí do svorkovnice.



obr. 1.4 Drážka motoru s dvouvrstevným vinutím,
1) drážkový klín, 2) vložka pod klín, 3) horní cívka, 4) drážková izolace,
5) mezivložka, 6) spodní cívka, 7) vložka na dno, převzato z [3].

Spojování konců cívek provádíme měkkým pájením a spoje následně obalujeme izolací. V některých případech se doporučuje izolací obalit i zbytek čel cívek, aby se tak zajistila zvýšená mechanická a izolační pevnost. Není však vyloučeno, aby celé vinutí zůstalo pouze lakované, zvláště u strojů pracujících na nižších napěťových hladinách (nutno zohlednit izolační pevnost laku a konstrukční požadavky stroje). Navinutý paket, popřípadě celý stator pak namáčíme do impregnační směsi a necháme vytvrdit. Impregnace zvýší izolační a mechanickou pevnost izolace, zlepší její tepelnou odolnost a odolnost vůči vnějším vlivům (vlhkost, prach, vnikání cizích částic). Jednovrstvá vinutí používáme u strojů s výkonem do 15kW. U větších strojů používáme výhradně vinutí dvouvrstvá. Jednovrstvá vinutí mají v drážce pouze jednu

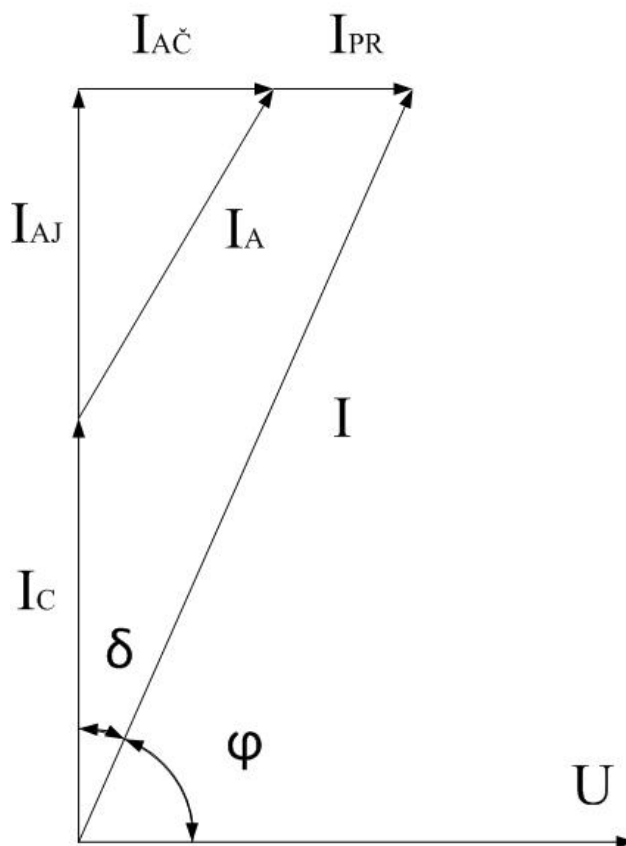
cívku, tedy jednu z jejích drážkových částí. U dvouvrstvých vinutí jsou v každé drážce dvě drážkové části dvou různých cívek, ty jsou od sebe navzájem izolované.

U velkých strojů, o výkonech větších než 100kW, místo drátů s malým průřezem používáme obvykle průřez obdélníkový. Takové vinutí nazýváme vinutí z polotuhých a tuhých cívek. Stejně jako u malých strojů jsou cívky navinuty vně stroje na speciální přípravek zohledňující potřebný obvod cívky. Rozdíl je však v samotném vkládání. U velkého stroje je průřez vodičů tak velký, že by nebylo možné vkládání jednotlivých vodičů úzkým hrdlem. Vinutí velkého průřezu je také velmi mechanicky pevné a je tak velmi obtížné jeho tvarování. Je tedy nutné každou cívku vytvarovat ještě před jejím založením do statorové drážky. K tvarování používáme automatický stroj, který vždy nastavíme na požadovaný tvar. Po jednoduchém nastavení jsou poté všechny cívky stejné. Cívky s odpovídajícím tvarem ještě dostatečně izolujeme v drážkové a čelní části. Tvar statorové drážky je v tomto případě obdélníkový. Pouze v horní části jsou po stranách drážky umístěny menší drážky, do kterých vsouváme drážkový klín zajišťující cívku uvnitř drážky. Vkládání pevných cívek je technologicky náročné. Vinutí velkých strojů je pak obvykle koncipováno jako dvouvrstvé, vkládání posledních cívek do paketu tak vyžaduje značnou mechanickou zručnost montérů. Při vkládání je možné cívky podle potřeby lehce ohýbat, nesmí se však poškodit jejich izolace, zejména pak vnitřní. Čela vinutí svazujeme a jistíme dodatečnou izolací pro zvýšení jejich mechanické odolnosti vůči dynamickým silám a vnějším mechanickým vlivům. Po založení cívek pospojujeme jejich konce podle předem daného uspořádání stejně jako u strojů se vsypávaným vinutím. Obvykle postačuje použití měkké pájky, pro zvýšení mechanické pevnosti spoje však můžeme použít i svaření netavicí se elektrodou v ochranné atmosféře. Spoje následně obalíme izolací a vyvedeme přívody vinutí do svorkovnice. Izolační systémy elektrických strojů budou podrobně popsány v kapitole 2 – izolační systémy.

U opravdu velkých strojů používáme tyčové vinutí. U tohoto typu vinutí vkládáme do drážek jednotlivé tyče, které následně spojujeme. Takovéto konstrukční provedení se používá u opravdu velkých strojů s výkonem v řádu MW, zejména pak u synchronních generátorů.

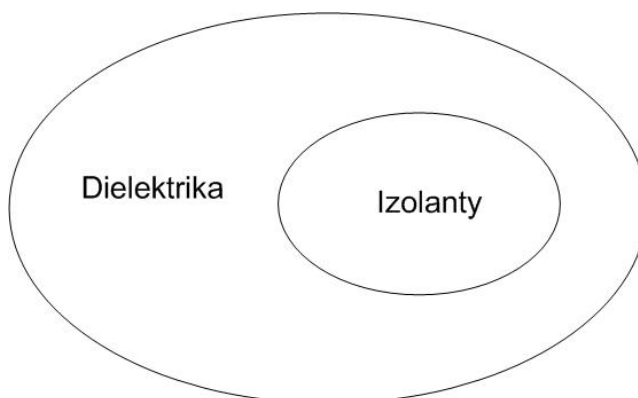
2 Materiálové aspekty

Dielektrické systémy jsou jednou ze čtyř základních skupin elektrotechnických materiálů, které můžeme také nazvat jako izolační materiály. Těch využíváme nejen u elektrických strojů, ale i v jiných elektrických zařízeních a aplikacích. Izolanty používáme ke galvanickému oddělení vodivých oblastí s různým elektrickým potenciálem a pro zabránění vzniku elektrického proudu. Izolanty existují v pevném, kapalném a plynném skupenství. V běžných elektrických točivých strojích se používají pouze pevné izolanty. Klíčovou vlastností izolantů je jejich měrný elektrický odpor. Materiály určené k izolování by měly mít ideálně nekonečný elektrický odpor, a to po zatížení libovolným napětím. Další důležitou vlastností je elektrická polarizace. Polarizace je schopnost volných i vázaných nábojů uvnitř izolantu pohybovat, či pouze se natáčet, vlivem vnějšího elektrického pole. Při tomto pohybu vzniká v materiálu ztrátové teplo, které vnímáme jako dielektrické ztráty. Schopnost materiálu „polarizovat se“ udává relativní permitivita ϵ_r , což je poměrná jednotka vztahovaná k permitivitě vakua ϵ_0 . Ideální izolační materiál používaný v elektrických strojích se chová jako ekvivalentní kapacita daná tvarem vodičů a prostředím ve kterém se nacházejí. Fázorový diagram takového izolantu by tedy odpovídal ideální kapacitě. Bez dielektrických ztrát u ideální izolace je fázový posun mezi vektorem napětí a proudu, běžně popisovaný jako úhel φ přesně 90° . Velikost dielektrických ztrát u reálného dielektrika vyjadřuje ztrátový úhel δ . Z tohoto úhlu následně vyjadřujeme ztrátový činitel $\operatorname{tg} \delta$. U dobrého izolačního materiálu je ztrátový činitel menší než 10^{-2} . Jak lze vidět v *obr.2.1* ztrátový úhel je doplněk fázového posunu do 90° . Dielektrické ztráty způsobené tzv. pomalou polarizací jsou vyjádřené činnou složkou absorpčního proudu $I_{A\check{c}}$. Jalová složka I_{AJ} je bezztrátová, jelikož je ve fázi s kapacitním proudem I_C . Zároveň je nutné brát v úvahu reálný elektrický odpor izolace (svod), který je čistě činného charakteru a způsobuje tok proudu I_{PR} (prosakovací proud).



obr. 2.1 Fázorový diagram reálného dielektrika

Polarizace je stav, kdy se v látce vytvoří vlastní vnitřní elektrické pole. Takovou látku nazýváme dielektrikum. Vysoká polarizace je požadována zejména u kondenzátorů, kde slouží pro ukládání elektrické energie do elektrostatického pole. Materiál účinně oddělující dvě oblasti s různým elektrickým potenciálem je izolant. Ne všechna dielektrika však mají vlastnosti izolantů.



obr. 2.2 Dielektrikum – Izolant, převzato z [1]

Každý izolant je tedy dielektrikem, ale ne každé dielektrikum je izolantem. Vztah mezi dielektriky a izolanty nejlépe zachycuje *obr. 2.2*.

Schopnost izolantu odolat elektrickým napětím vyjadřuje jeho elektrická pevnost E_p . Elektrická pevnost je dána napětím, při kterém materiál o určité tloušťce ztrácí izolační vlastnosti (rapidně klesne jeho rezistivita), eventuelně může vzniknout elektrický výboj, poklesne napětí mezi izolovanými oblastmi a obvodem teče značně zvýšený proud. Je tedy zřejmé, že čím je elektrická pevnost větší, tím větší napětí daný izolant zvládne izolovat bez ztráty požadovaných vlastností. Elektrickou pevnost materiálu ovlivňuje doba expozice danému napětí, ale i technologické a vnější vlivy.

U plyných a kapalných izolantů mluvíme o vývinu elektrického výboje a tím pádem ztrátě izolačních vlastností materiálu jako o přeskoku. Na rozdíl od pevných izolantů jsou plyny schopné regenerace po zániku výboje. Plyné izolanty jsou schopné regenerace prakticky okamžitě. Rychlost regenerace u kapalných izolantů může být závislá na případném proudění kapaliny. Při hoření oblouku totiž vznikají spaliny, které mohou mít nízký elektrický odpor bez možnosti chemické přeměny zpět na původní izolační materiál (minerální olej). Samotná regenerace je tedy spíše „odplavení“ či pokles těchto spalin z dosahu oblasti se zvýšenou intenzitou napětí. Jak již bylo řečeno tak u běžných elektrických strojů využíváme pouze pevných izolantů. Ztrátu izolačních vlastností pevných izolantů nazýváme průraz. Přeskok i průraz mají podobný průběh. U pevných izolantů však není možná regenerace a zhoršení izolačních vlastností je trvalé.

Další vlastnost ovlivňující použití izolantu je jeho tepelná odolnost. Izolanty jako reálné materiály mají tepelné meze, při kterých se mění jejich fyzikální a chemické parametry. Tyto změny mohou omezit či přímo změnit jejich izolační vlastnosti. Z hlediska teplotní odolnosti rozlišujeme izolační materiály podle normy ČSN EN 60085 „Elektrická izolace – Teplotní klasifikace“ do teplotních tříd. Každá teplotní třída je charakterizována pracovní teplotou daného zařízení. Jednotlivé teplotní třídy spolu s jejich RTE indexem, jsou popsány v *tab.2.1*. V tabulce je též uvedeno předchozí značení jednotlivých teplotních tříd. Index teplotní odolnosti RTE, též definovaný ve zmiňované normě, udává teplotu ve stupních Celsia, při které má materiál uspokojivé vlastnosti po požadovanou dobu jeho životnosti. [1]

Teplotní třída se obvykle vztahuje na celé zařízení, či v našem případě na stroj. Nemusí však být nutně stejná pro všechny jeho části. Při stanovení teplotní třídy daného stroje tedy hledáme průnik teplotních tříd jednotlivých částí stroje.

Tab. 2.1 Teplotní klasifikace izolantů, převzato z [1]

Relativní index teplotní odolnosti RTE	teplotní třída	Předchozí značení
< 90	70	
> 90 - 105	90	Y
> 105 - 120	105	A
> 120 - 130	120	E
> 130 - 155	130	B
> 155 - 180	155	F
> 180 - 200	180	H
> 200 - 220	200	
> 220 - 250	220	
> 250	250	

Izolační systémy elektrických strojů jsou tedy omezeny již samotnými vlastnostmi materiálů. Ne vždy se však jedná o elektrické vlastnosti a vlastní výběr materiálu musí vycházet i z pracovního prostředí stroje.

2.1 Izolace vodičů

Samotné vodiče jsou základní prvek elektrického obvodu statoru asynchronního motoru. Pro správný chod stroje a funkci izolačního systému je důležité jejich vzájemné izolování v drážce. Asynchronní motory pracující na hodnotách nízkého napětí (do 1000V) jsou obvykle vybaveny vodiči izolovanými pouze elektroizolačním lakem o síle v řádu desetin milimetru. Síla a druh izolace závisí na výšce pracovního napětí a posláním vodiče ve stroji. U strojů pracujících s vysokým napětím již nemusí být lakování dostatečné.

Samotný vodič je tedy pro tyto účely nutné izolovat složitější izolací [1]:

- *Bavlněnou, hedvábnou či skleněnou přízí*
- *Polyamidovým hedvábím*
- *PET fólií*
- *Slídovou páskou*
- *Neimpregnovaným papírem*

Z laků pak je možné použít [1]:

- *Polyesterimidový lak*
- *Polyimidový lak*
- *Tereftalátový lak*
- *Silikonový lak*
- *Polyuretanový lak*

Kvalitu izolace samotných vodičů se v případě velkého objemu výroby a s tím souvisejícím velkoobchodním nákupem materiálu vyplatí pravidelně ověřovat. Vhodné je také kontrolovat izolaci samotných vodičů, v klíčových částech technologie výroby.

2.2 Drážková izolace

Mezi samotné vodiče či předpřipravené cívky vkládáme drážkovou izolaci. Tato dodatečná vrstva izolačního materiálu chrání vodiče a jejich vlastní izolaci před mechanickým poškozením při vkládání. Mezi vodiči a uzemněným paketem může být rovněž v případě uzemněné soustavy či v případě poruchy poměrně velké napětí. Je tedy vhodné mít v místě zvýšené intenzity elektrického napětí dodatečnou izolaci. K vyložení drážky můžeme použít drážkovou lepenku či Nomex.

2.3 Impregnace

U menších strojů nebo u strojů pracujících s nízkým napětím se cívky po založení, které jsou izolovány pouze vlastní izolací vodičů, pouze impregnují. Samotná impregnace se pak provádí máčením, zaplavováním nebo zakapáváním. Jelikož jsou impregnační látky kapalné, vyplní dílčí vzduchové mezery mezi samotnými vodiči i mezery mezi vodiči a drážkami. Tyto látky na bázi pryskyřic mají elektrickou pevnost mnohonásobně vyšší než samotný vzduch. Celkově tak zvyšují elektrickou pevnost izolace. Zároveň se tak omezují další ztráty způsobené elektrickými jevy, například částečné výboje. [1]

Jednosložkové polyesterové pryskyřice používáme při máčení za atmosférického tlaku, vakua i tlaku. Tyto pryskyřice neobsahují styren a umožňují tak rychlé vytvrzení při nízkých teplotách. Používáme je ve třídě H (180 °C) a jejich elektrická pevnost je

mezi 120 a 150 kV.mm⁻¹. Laky na bázi nenasyčené polyesterimidové pryskyřice nanášíme máčením a zaplavováním za rotace. Vytvrzení probíhá elektrickým proudem a UV zářením. Také jsou použitelné pro třídu H, při elektrické pevnosti mezi 80 a 100 kV.mm⁻¹. Pro zakapávání je možné použít roztok nenasyčené polyesterimidové pryskyřice ve styrenu. Takové složení je použitelné ve strojích třídy F (155 °C) při elektrické pevnosti 80kV.mm⁻¹. Pro zalití technologických prostor je možné použít dvousložkové polyuretanové látky. Vytvrzování probíhá za normální teploty. Po vytvrzení mají formu tvrdé gumy s tepelnou odolností do 130 °C, při elektrické pevnosti 20 až 27 kV.mm⁻¹. [1]

2.4 Systém resin-rich

U strojů pracujících na vyšších napěťových hladinách je již samotná izolace vodičů nedostačující. Jednou z možností jak zajistit dostatečnou míru izolace je systém resin-rich. Základem tohoto systému je tříložkový kompozit. Nosnou částí tohoto kompozitu je skleněná tkanina. Šířka této vrstvy se stáčenými vlákny je 0,14mm. Izolační bariérou je pak kalcinovaný slídový papír. Pojivem kompozitu je reaktoplastická bezrospouštědlová novolaková nebo cykloalifatická epoxidová pryskyřice. Materiál pro tvorbu izolačního systému je dodáván v předtvrzeném stavu. Na navinutou a vytvarovanou cívku se nanese šířka kompozitu dle pracovního napětí vyráběného stroje s určitou rezervou pro zajištění vyšší spolehlivosti. Následně je za teploty a tlaku udávaného výrobcem daného kompozitu izolační materiál vytvrzen. Teploty vytvrzování se pohybují od 160 do 170°C. Vytvrzování probíhá ve formách, které zajistí požadovaný tvar izolační vrstvy. Po vychladnutí cívky jsou cívky připraveny pro montáž. [1]

Výhodou systému resin-rich je snadná demontáž jednotlivých cívek vinutí v případě poruchy.

2.5 Systém VPI

Dalším používaným izolačním systémem je systém *Vakuově tlakové impregnace*. Základem tohoto systému je savá slídová páska. Nosnou částí je skleněná tkanina, polyesterové rouno nebo fólie popřípadě polyamidová fólie. Touto páskou izolujeme jednotlivé vodivé části stroje. Savá páska je impregnována bezrospouštědlovou

epoxidovou polyesterovou nebo silikonovou pryskyřicí. Vlastní impregnace probíhá ve vakuotěsném kotli vybaveném ohřívacím a chladicím zařízením. Vysušený stroj s vinutím umístíme do tohoto kotle. Vzniklé vakuum odstraní i zbytky těkavých látek a vlhkosti. Poté je kotel zaplaven impregnační látkou. Obvykle po hodině je pak v impregnačním kotli vytvořen přetlak, který zajistí průnik impregnantu do všech částí vinutí. Poté následuje vytvrzení. [1]

Výhodou systému VPI je dokonalejší izolace materiálu a izolační systém je tak méně náročný na prostor. Nevýhodou je náročná technologie výroby. Zároveň není možná oprava vadných cívek vinutí po vytvrzení bez poškození celého izolačního systému.

3 Diagnostický systém

Při výrobě, údržbě, ale i pouhém výběru vhodných materiálů je klíčový obor diagnostika. Samotné označení tohoto oboru vychází z řeckého slova „diagnosis“, které znamená rozpoznání či určení. V technické praxi má diagnostika podobně jako u lékařských oborů za cíl zjistit aktuální stav (diagnózu) zkoumaného objektu a určit pravděpodobnou prognózu stavu objektu. Na základě diagnostiky se pak může upravit režim použití objektu či doporučit jeho vyřazení z provozu pro nutnou údržbu. [2]

K diagnostice existují dva různé přístupy. Prvním je přístup *fenomenologický*, při kterém sledujeme odezvy na přikládané diagnostické signály. Sledujeme tedy diagnostikovaný objekt jako celek. Výhodou tohoto přístupu je jeho jednoduchost a nenáročnost na obsluhu. Postačuje také základní měřicí vybavení. Druhým možným je *strukturální* přístup. Jak je již z názvu patrné, sledujeme strukturu materiálu a veškeré její změny. Tento přístup není tak tradiční jako fenomenologický, poskytuje však široký rozsah informací. Nevýhodou je jeho náročnost na aparaturu a s tím spojená náročnost na znalosti obsluhy.

Jedním ze základních prvků elektrotechnické diagnostiky je diagnostický systém. Je to systém prvků a podsystémů, které zkoumají samotný diagnostikovaný objekt. Výstupem diagnostického systému jsou informace o aktuálním stavu objektu, popřípadě pokyny pro obsluhu diagnostikovaného zařízení. Systém samotný sestává z instrumentálního vybavení potřebného pro vysílání diagnostických signálů a měření

výstupních veličin. Dále pak z modelu samotného diagnostikovaného objektu, který simuluje stavy na příslušné signály. Odezvy na diagnostické signály se porovnávají se signály simulovanými modelem a získává se tak porovnání mezi ideálním a skutečným stavem. Diagnostikovaný objekt může být ve stavu bezporuchovém, poruchovém nebo provozuschopném. Bezporuchový stav je takový, kdy je umožněn běžný provoz zařízení. Objekt v poruchovém stavu není schopen vykonávat své funkce. Mezi těmito krajními stavy je již zmiňovaný provozuschopný stav, při kterém zařízení plní funkce pouze částečně.

Podle ovládání dělíme diagnostiku na manuální, automatickou a řízenou počítačem. Manuální diagnostiku ovládá k tomu určený operátor. Ovládá jednotlivé generátory diagnostických signálů a sleduje jejich odezvy. Informace o prováděné diagnostice jsou zpracovány do zkušebních protokolů. Automatická diagnostika je také řízena technikem, ten však pouze dohlíží. Samotné posílání signálů a jejich vyhodnocování vykonává automatická jednotka. Výsledky automatické diagnostiky je možné zobrazit na displeji či vytisknout. Počítačem řízená diagnostika je vhodná pro realizaci on-line diagnostiky. Informace z jednotlivých měřících zařízení jsou zapisovány počítačem v předem stanovených intervalech, s možností následného grafického výstupu. [2]

Elektrotechnickou diagnostiku můžeme vykonávat na zařízení bez přerušení jeho provozu. Takovou diagnostiku nazýváme on-line diagnostikou (také jako funkční diagnostika). Opakem je off-line diagnostika (testovací diagnostika), kdy se zkoumané zařízení nachází v klidovém stavu. Cílem této práce je prozkoumat zejména možnosti diagnostiky cívek při samotné výrobě, kdy je provoz zařízení vyloučený. Zaměříme se tedy pouze na testovací diagnostiku.

3.1 Diagnostická měření

Součástí jakékoliv diagnostiky jsou diagnostické signály. S výjimkou on-line diagnostiky, kde se místo uměle dodaných měřících signálů dodávají do diagnostického systému signály pracovní, si diagnostické signály volíme podle požadovaného měření. Diagnostické měření je někdy uváděno jako diagnostický signál. Klíčové je určení míst, kam dané diagnostické signály přivedeme. Informace pak získáme snímáním odezev na přiváděné signály. Výběr diagnostických signálů

musí brát ohled na objektivitu diagnostiky. Při nejmenší ekonomické a materiální náročnosti musíme získat takové množství informací, které je s ohledem na důležitost a hodnotu zařízení dostatečné pro účinnou diagnostiku.

Před výběrem diagnostických signálů je vhodné nejprve provést diagnostické šetření. Toto šetření sestává z následujících kroků: [2]

- *výběr vyšetřovaných vlastností*
- *stanovení diagnostického systému – určení metod*
- *stanovení a příprava zkušebních vzorků*
- *vlastní diagnostické šetření – měření ověřovaných vlastností*
- *vyhodnocení – zpracování získaných výsledků*

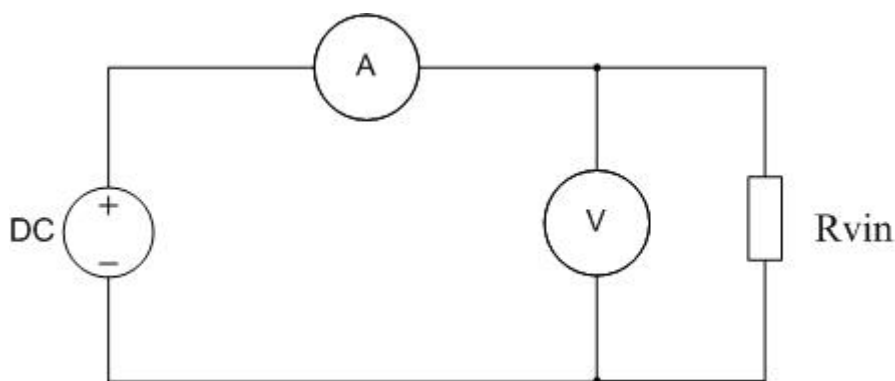
Diagnostické signály se obecně týkají veškerých elektrických zařízení. Je tedy zřejmé, že všechny signály nejsou vhodné pro zadávané diagnostikování cívek asynchronních motorů.

3.1.1 Odpor vinutí

Elektrický obvod je důležitou součástí elektrického stroje. Elementárním prvkem tohoto obvodu je elektrický vodič. Na tento vodič působí mechanické a tepelné vlivy, které mohou způsobit jeho poškození, popřípadě přímo přerušení. Takové poškození má nevratné důsledky, a pokud nastane uvnitř vinutí je nutné poškozený stroj převinout. Měření odporu vinutí tedy bývá základem správné diagnostiky elektrického stroje. Zároveň můžeme ze zjištěného odporu vinutí zjistit při dalších zkouškách podíl Jouleových ztrát.

Nejjednodušší metodou pro zjištění odporu vinutí je Ohmova metoda, známá také jako volt-ampérová metoda.

Hodnoty odporu vinutí asynchronních strojů středních výkonů obvykle nepřekračují velikost jednoho ohmu. Z tohoto důvodu pro zvýšení přesnosti používáme zapojení pro měření malých odporů. Úbytek napětí na ampérmetru již není zanedbatelný, proto jej řadíme před voltmetr. Samotný odpor počítáme podle Ohmova zákona. U asynchronních motorů a dalších elektrických třífázových strojů měříme každou fází zvlášť.



Obr. 3.1 Schéma zapojení Ohmovy metody pro měření malých odporů.

Pro zvýšení přesnosti provedeme více měření a spočteme průměr. Použitý zdroj by měl poskytovat dokonale stejnosměrné napětí. Změny v napětí vyvolávají přechodové děje ve vinutí a ovlivňují tak měření. Aby bylo možné měřit napětí na vinutí je potřeba dodat dostatečně velký proud. Obvykle se proud dostane do velkých hodnot i při nízkých hodnotách napětí. Zdroj by měl být tedy regulovatelný. I přes všechny moderní elektronické zdroje je tak nejspolehlivějším napájecím zdrojem výkonný akumulátor s reostatem. Na trhu jsou však dostupné i snadno přenositelné miliohmometry. Digitální přístroje zároveň zajistí rychlé odečítání měřených hodnot a zamezí tak příliš velkému ohřevu vinutí.

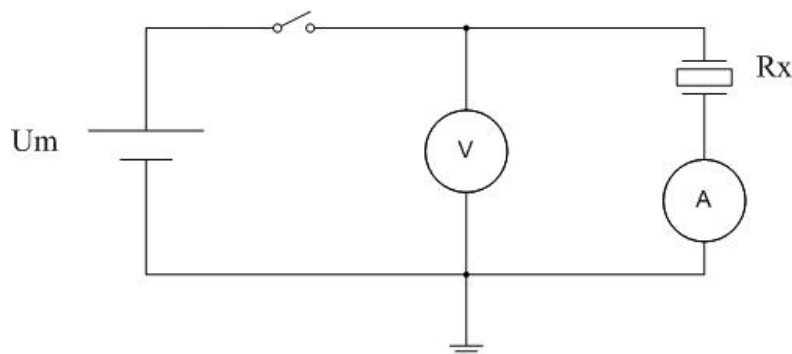
Měření odporu vinutí odhalí velké nesymetrie v odporech. Obtížně jsou zjistitelné drobné odchylky způsobené například chybným počtem závitů nebo menší mezizávitové zkraty. Rozdíl v odporu totiž nemusí překročit běžně se objevující rozptyl. Pro měření jednotlivých cívek je tato metoda velice neefektivní.

3.1.2 Absorpční a resorpční charakteristiky

Již jsme si uvedli, že jedním ze základních prvků asynchronního motoru, ale i jiného elektrického stroje je jeho izolační systém. Musíme tedy mít metodu pro určení stavu

tohoto systému. Jednou z těchto metod je měření absorpční a následně resorpční charakteristiky.

Z tohoto měření zjistíme izolační odpor a polarizační index. Zvláště pak izolační odpor R_{IZ} je brán jako základní parametr izolace. Nejjednodušší možné zapojení je realizováno pomocí voltampérové metody. Schéma zapojení je zobrazeno na obr. 3.2.



Obr. 3.2 Schéma zapojení pro měření absorpčních a resorpčních charakteristik, převzato z [2]

Měřený vzorek představuje R_x . Pokud měříme vzorek ve formě desky či listu (obecně pevné rovné plochy) použijeme kruhové elektrody. Měřením vzorků izolačních materiálů můžeme ověřit, zda jsou shodné s údaji výrobce. V praxi je nutné měřit nejen parametry samotných materiálů, ale i elektrické stroje a zařízení. Mezioperačním měřením si tak ověřujeme kvalitu izolace mezi klíčovými kroky výroby. Stejně můžeme zjistit stav zařízení při vstupní či výstupní zkoušce. Pro tato měření již není použitelný systém kruhových elektrod. Elektrody však můžeme připojit na místa (svorky), kde musí být dodržena stanovená míra izolace (například mezi vinutím a neživou konstrukcí). Obtížné může být měření jednotlivých cívek ještě před vložením do statorového paketu. Obvykle se pro stanovení izolačního stavu jednotlivých cívek při sériové výrobě používají jiné metody. Je však možné tyto již izolované cívky obalit měděnou fólií a měřit mezi touto fólií a vodiči.

Důležité je použité napětí. Za reálný elektrický izolant totiž považujeme materiál s rezistivitou od 10^6 do 10^{16} $\Omega \cdot m$. Rezistivita je tak vysoká, že při nízkém napětí jsou proudy „procházejícím“ izolantem prakticky neměřitelné. Měřící napětí (na schématu zobrazeno jako U_m) musí být dostatečně vysoké. Zároveň však nesmí způsobit průraz měřeného vzorku. V praxi se používají napětí 500, 1000, 2500, 5000, 10000 a 15000

V. Důležitá je také stabilita tohoto napětí. Příliš velké výchylky zkreslují měření. [2]

Polarizační index je bezrozměrnou veličinou. Vyjádříme jej jako poměr proudů procházejících měřeným vzorkem v 15 a 60 sekundě, respektive v 60 a 600 sekundě měření. Podle času měření pak rozeznáváme minutový - p_{i1} a desetiminutový polarizační index p_{i10} . Místo proudů můžeme použít ve stanovených dobách i hodnoty izolačních odporů:

$$p_{i1} = \frac{i_{15}}{i_{60}} = \frac{R_{60}}{R_{15}} \quad (3.1)$$

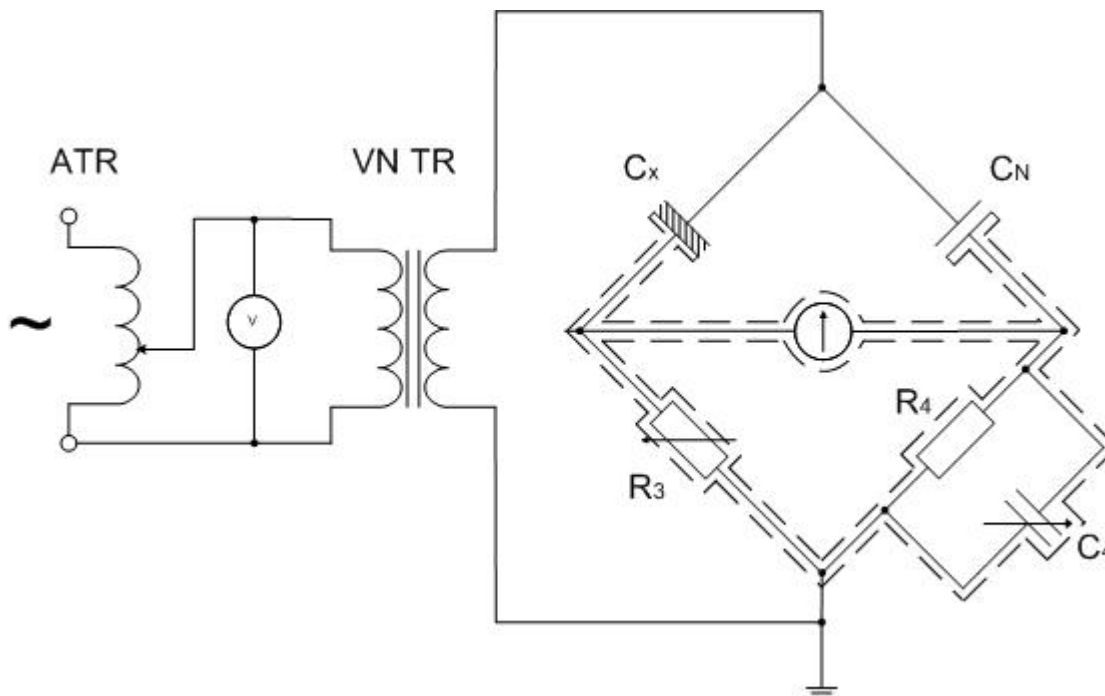
Pokud měřený materiál obsahuje velké množství volných nosičů náboje, způsobují tyto nosiče velký vodivostní proud. Tento proud se v čase nemění tak jako proud způsobený absorpcí a hodnota polarizačního indexu se blíží jedné. Takový materiál je s největší pravděpodobností vlhký, popřípadě je izolace jinak poškozena. Naopak pokud je izolace v dobrém stavu a materiál suchý, převládá proud absorpční. Proud postupně klesá. Polarizační index kvalitních izolantů pak pohybuje mezi 3 a 6. [1]

Pro jednoduchost měření používáme v běžných pracovních podmínkách testery izolačních odporů (často nazývané Megmet, podle kdysi velmi rozšířených zařízení firmy Metra Blansko). Obsahují obvykle vlastní kalibrovaný zdroj měřicího napětí a citlivý ampérmetr. U analogových přístrojů je ampérmetr přímo cejchovaný na jednotlivé hodnoty izolačního odporu v megaohmech. Moderní digitální přístroje mají automatickou změnu rozsahu, zobrazení okamžitého měřicího napětí a možnost přímého výpočtu polarizačního indexu.

3.1.3 Ztrátový činitel

Při diagnostice izolačního systému je kromě samotné izolační schopnosti důležitý také ztrátový činitel. Jak bylo uvedeno v kapitole 2, tento činitel vyjadřuje velikost dielektrických ztrát v izolačním systému. Pro přesnější stanovení parametrů izolačního systému je nutné změřit také frekvenční závislost ztrátového činitele. K běžné kontrole vyrobeného stroje vystačíme se síťovou frekvencí. Využíváme při tom můstkových metod. Nejpoužívanější je metoda Scheringova můstku. Schéma zapojení můstku je na

obr. 3.3. Scheringovým můstkem nejčastěji měříme celý stroj v rámci vstupních, mezioperačních či výstupních zkoušek. Stejně jako u absorpčních charakteristik je možné měřit libovolný vzorek při použití vhodných elektrod.



Obr. 3.3 Schéma zapojení Scheringova můstku

Napájení můstku je zajištěno dvojicí transformátorů. První je autotransfornátor, kterým měníme velikost napětí vstupujícího do druhého transformátoru. Tím je vysokonapěťový transformátor s vhodným poměrem. Tento transformátor zvyšuje napětí na napětí, při kterém provádíme měření. Pokud bychom měřili v hodnotách do velikosti síťového napětí, stačil by pouze autotransfornátor. V praxi se však tato metoda často používá i pro měřicí napětí v řádu kilovoltů. Napětí měříme voltmetrem na straně nižšího napětí vysokonapěťového transformátoru a následně přepočítáváme podle převodu. Vyhneme se tak použití vysokonapěťových sond a převodníků. Transformátory musí mít dostatečný výkon.

Samotný můstek tvoří dvě hlavní části. Vysokonapěťovou část představuje měřený vzorek či stroj (na schématu uvedeno jako C_x) a kapacitní normál C_N . Měřený vzorek nahrazujeme náhradním obvodem složeného z ideálního kondenzátoru a ideálního rezistoru. Náhradní obvod může být sériový či paralelní. Podle zvoleného zapojení je nutné upravit vztah pro výpočet ztrátového činitele. Pro kapacitní normál je obvykle

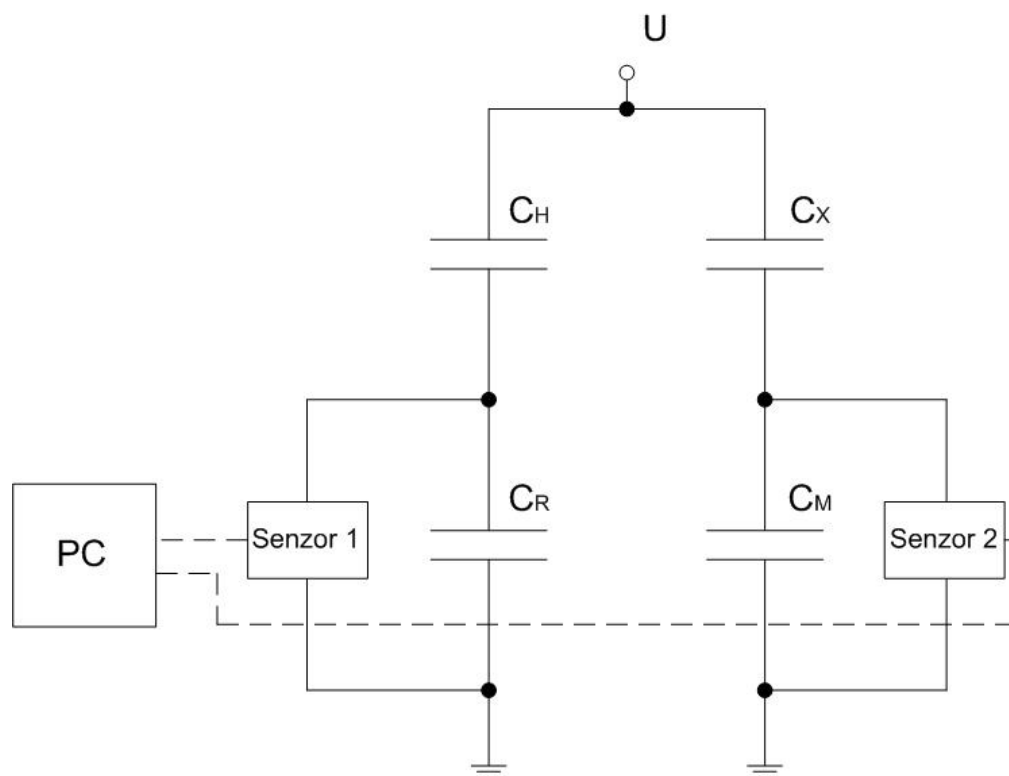
použit vysokonapěťový kondenzátor se zanedbatelnými ztrátami, plněný plynným dielektrikem. Druhou část můstku, tzv. vyvažovací část tvoří proměnný odpor R_3 a paralelní kombinace R_4 s C_4 . Celá vyvažovací část je umístěna mimo oblast s vysokonapěťovou částí. Proměnný odpor a kapacitu tvoří dekády pro hrubé vyvažování a potenciometry s ladícími kondenzátory pro jemné vyvažování. Celá vyvažovací aparatura je obvykle v jednom obalu. V uzlech kde vysokonapěťová část přechází na vyvažovací je vhodné pro větší bezpečnost umístit svodiče přepětí. Ty v případě průrazu měřeného vzorku či kapacitního normálu svedou přepětí, které by jinak mohlo ohrozit vyvažovací část či její obsluhu. Nejdůležitější je nulový Indikátor. Je umístěný mezi větvemi můstku a slouží k měření rozdílu potenciálů mezi středy obou větví. Při nulovém rozdílu je můstek vyvážený. Pro sériový náhradní obvod pak platí vztah:

$$C_S = C_X = \frac{R_4}{R_3}, \quad (3.2)$$

a ztrátový činitel určíme takto:

$$\operatorname{tg} \delta = \omega C_S R_S = \omega C_4 R_4, \quad (3.3)$$

Vyvažovací část je pro omezení vlivu rušení stíněna. Pro omezení vlivu rušení z napájecí sítě můžeme použít filtr. Měření můžeme opakovat pro různá napětí, frekvence či teploty.



Obr. 3.4 Zjednodušené schéma automatického můstku. [2]

Nyní jsou kromě ručně vyvažovaných můstků k dispozici také ty automaticky vyvažované. Zjednodušené schéma automatického můstku je na obr. 3.4. Tyto můstky vycházejí z klasického Scheringova můstku. Kondenzátory C_H a C_X , kde C_X je měřený vzorek, jsou vysokonapěťové, C_R a C_M pak nízkonapěťové. Automatické můstky využívají měření fázového posunu napětí na nízkonapěťových kondenzátorech (C_R a C_M). Velikost kapacity získáme z dělicího poměru měřící větve. Zpracovávání měření probíhá v PC pomocí Fourierovy transformace. Přenos signálu z čidel do PC může být realizován pomocí optických kabelů. [2]

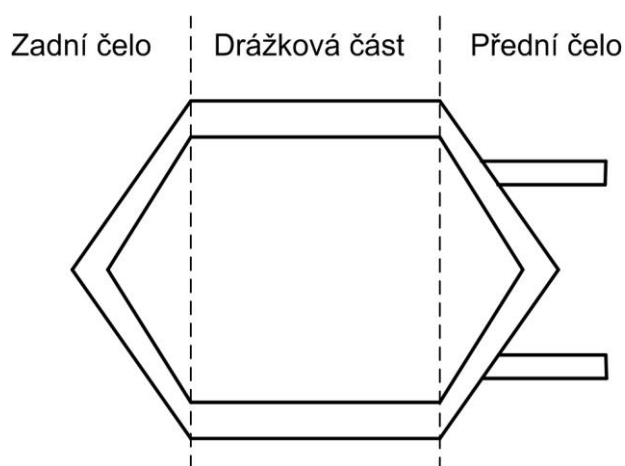
3.1.4 Napěťové zkoušky

Pro stanovení elektrické pevnosti diagnostikovaných zařízení a materiálů pro jejich výrobu používáme napěťové zkoušky. Podle druhu přiloženého napětí rozeznáváme zejména zkoušky stejnosměrným napětím, zkoušky střídavým napětím a zkoušky impulzním napětím. Popis zkoušek a postupy shrnuje norma ČSN IEC 60-1. [1]

Napětí vždy přikládáme na předem určené body, ve kterých ověřujeme elektrickou pevnost. Pro zkoušení plochých izolačních materiálů (desek, fólií, apod.) použijeme opět systém kulových elektrod. U hotových strojů či zařízení přikládáme napětí

obvykle na přívodní svorky. Musíme ovšem zajistit ochranu vedlejších systémů, kterých se zkouška netýká, proti poškození zkušebními napětími. Nejčastěji provádíme zkoušku izolace mezi silovým obvodem (např. vinutí motoru) a obalem (lidově „kostrou“) stroje.

Velmi efektivní jsou napěťové zkoušky pro zkoušení jednotlivých cívek asynchronního motoru, zvláště pak u cívek určených do motorů pracujících s vysokým napětím. Takových cívek může být i 70 na jeden motor. Pro plynulost výroby je vhodné použít klešťové elektrody s velkou plochou. Obvyklý tvar cívky, včetně vyznačených oblastí je zobrazen na *obr. 3.5*.



Obr. 3.5 Cívka asynchronního motoru – zobrazení jednotlivých oblastí

Cívku položíme na kovovou desku, připojenou k zemnímu vodiči. Elektrody přikládáme na rovné části čel a na drážkovou část. Samotné elektrody jsou také připojeny k zemnímu vodiči. Na odizolované konce cívky připojíme zdroj vysokého napětí. Samotný zdroj připojujeme vždy přes dostatečně vysoký odpor, pokud již není součástí zdroje. Odpor zajistí po případném průrazu izolace pokles napětí působícího na izolaci a uhasí tak vzniklý oblouk. Zároveň tak zabrání vzniku velkého proudu. Druhý pól zdroje připojíme na zemnicí soustavu, nejlépe přímo na kovovou desku pod cívkou.

Samotné zkoušky dělíme na zkoušky výdržným napětím, zkoušky průrazným napětím a zkoušky zaručeného průrazného napětí. Při zkoušce výdržným napětím pomalu zvyšujeme napětí na zkoušeném objektu, dokud nedosáhneme hodnoty zkušební

napětí. Toto napětí držíme předepsanou dobu. Pokud za tuto dobu nenastane průraz izolace, je zkouška úspěšná. Zkouška průrazným napětím slouží pro zjištění hodnoty samotného průrazného napětí. Přiložené napětí plynule zvyšujeme do okamžiku průrazu. Průrazné napětí zaznamenáme. Zkouška zaručeného přeskokového napětí má podobný průběh jako zkouška průrazného napětí. Požadavky na zkoušku jsou splněny, jestliže průrazné napětí není vyšší než zaručené průrazné napětí při každém přiložení napětí z určitého počtu. [2]

Napěťové zkoušky vždy způsobují degradaci izolačních systémů, při průrazu dokonce jejich zničení. Snažíme se tedy jejich počet v průběhu výroby omezit tak abychom nadměrně nezatežovali izolační systém daného zařízení. Na druhou stranu jsou tyto zkoušky nejprůkaznější z hlediska zjištění odolnosti zařízení. Kompromisem je provádění těchto zkoušek v klíčových okamžicích výroby. Například kontrolou zmiňovaných cívek před jejich vložením do statorového paketu se vyhneme velkým finančním ztrátám.

3.1.5 Zkoušení mezizávitové izolace

Všechny doposud uváděné metody byly zaměřeny na diagnostiku izolace, která je svým způsobem „snadno dostupná“. V elektrických strojích jsou ale i místa kde jsou izolační vlastnosti stejně důležité. Běžnými metodami však nelze účinně zjistit stav této izolace. Jedná se o mezizávitovou izolaci nebo zkráceně závitovou izolaci. Tato izolace zabraňuje proudu téci mezi jednotlivými vodiči v cívce. Pokud se závitová izolace poškodí, dojde ke spojení sousedních vodičů a nastává závitový zkrat. Poškozená cívka pak vykazuje nejen jiný činný odpor, ale pokud je zkrat dokonalý mění se také počet závitů této cívky. Zvětšuje se tak proud procházející strojem. Zvýšený proud způsobuje zvýšený ohřev vinutí. Zrychluje se tím tedy degradace izolace a to celého izolačního systému. Obvykle nejsou závitové zkraty po jednotlivých fázích statoru rozmístěny symetricky. Postižený stroj tedy začne odebírat i nesymetrický proud. Závitové zkraty tak obvykle po překročení určitého stupně poškození stroje končí jeho generální opravou (převinutím).

Nemůžeme tedy v průběhu výroby cívek pro asynchronní motor zanedbat kontrolu závitové izolace. Pro minimalizaci finančních ztrát se doporučuje zkouška závitové izolace po každé operaci, která by mohla způsobit její poškození. Jedná se o navíjení

drátů, ohýbání cívek do požadovaných tvarů a o vkládání hotových cívek do statorového paketu. Zabráníme tak zbytečné práci na vadných cívkách, ale i zbytečně provedené impregnaci vadného statoru.

Nejefektivnější metodou pro odhalování vad mezizávitové izolace je zkouška proudovými impulzy. V praxi často označena jako rázová zkouška. Metoda využívá vlastní indukčnosti každé cívky. Průběh okamžitého napětí na cívce bez vlastní indukčnosti by tvarem pouze kopírovalo proudový impuls. Indukčnost však zabrání skokovému nárůstu proudu. Samotný proudový impuls obvykle vyvoláváme pomocí nabitého kondenzátoru. Po připojení tohoto kondenzátoru na cívku vznikne přechodný děj druhého řádu. Paralelní kombinace indukčnosti, kapacity a velice malého odporu způsobí rozkmitání obvodu. Od hodnot jednotlivých prvků v tomto obvodu je pak odvozena perioda vlastních kmitů i jejich amplituda. Pokud zajistíme stejné podmínky (tedy velikost jednotlivých prvků oscilačního obvodu) bude obvod kmitat pokaždé se stejnou periodou a amplitudou. Stejnou kapacitu nám zajistí právě kondenzátor v generátoru proudových pulzů. Tento kondenzátor před každým pulzem také nabitím kalibrovaným zdrojem napětím, nabijeme vždy na stejnou hodnotu napětí. Velikosti odporu a indukčnosti pak stanovuje již samotný tvar a počet závitů cívky. Všechny cívky v motoru jsou stejné, zejména pak počet jejich závitů. Všechny cívky vyráběné v sérii pro jeden motor tedy mají stejný průběh kmitavého děje vyvolaného stále stejným proudovým impulzem. Průběhy tak můžeme vzájemně porovnávat a odhalit tak jejich odchylky. Pokud nastane závitový zkrat, změní se počet závitů a odpor cívky. Vzniklý kmitavý děj nebude shodný s ostatními a cívku tak vyhodnotíme jako vadnou.

Aby rázová zkouška byla efektivní, je nutné mít k dispozici zdroj stejného proudového, respektive napěťového impulsu. S ohledem na velikost cívky a počet závitů musíme také měnit velikost napětí, které vyvolává impuls. V praxi se obvykle zkouší velké množství cívek. Zdroj tedy musí být schopen dodávat více pulzů v krátké době, aby nevznikaly prodlevy ve výrobě. Důležité je také snímání kmitů. Snímat můžeme buď proud procházející obvodem nebo napětí na jednom z prvků (kapacitě či cívce). Samotný snímač nesmí ovlivňovat měření. Musí však dodávat přesné informace a být schopen vzorkování (snímání) s vysokou frekvencí. Data ze snímače zobrazíme na osciloskopu. Nejlepší volbou je digitální osciloskop s pamětí. Do paměti

můžeme „nahrát“ referenční křivku, kterou budeme porovnávat s křivkami kmitů jednotlivých cívek. Dostupné jsou také hotové rázové generátory. Kromě zařízení pro generování pulzu a měření, obsahuje též vlastní počítač. Tento počítač zajišťuje nahrávání křivek a jejich porovnání. Obvykle je také možné nastavit více algoritmů pro porovnávání křivek. Výpočetním systémem se odstraní chyba lidského faktoru. Některé přístroje je taky možné připojovat do internetové sítě. Výsledky jsou poté dostupné například na firemní síti. Jedním z předních výrobců těchto generátorů je firma SPS electronic.

Metodu rázové zkoušky můžeme kromě samotných cívek použít i pro diagnostiku již hotového elektrického stroje. Místo jednotlivých cívek však budeme porovnávat průběhy kmitů jednotlivých částí vinutí stroje.

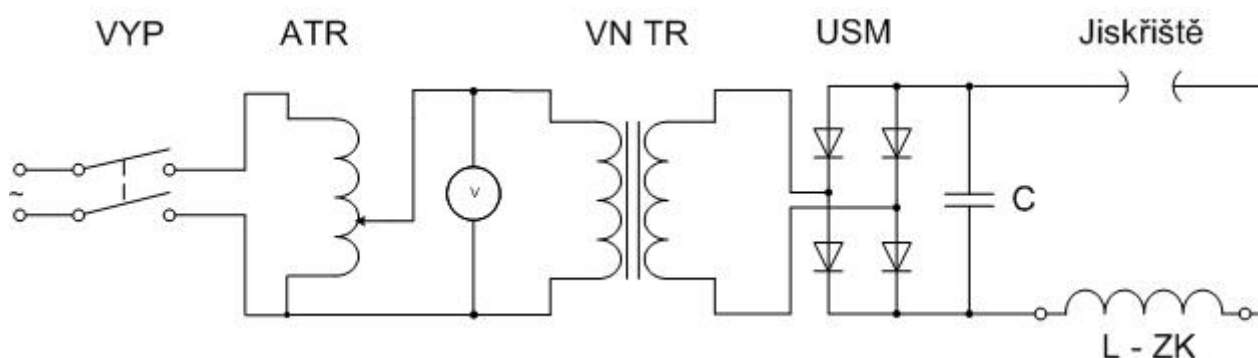
4 Návrh Rázového generátoru

Diagnostika vyráběných statorových cívek slouží ke stanovení jejich stavu, před vložením do statorového paketu. Důležitá je jejich izolační schopnost. Vodič samotný je u strojů středního výkonu méně náchylný na přerušení. Obvykle tedy provádíme pouze zkoušky na ověření stavu izolace cívky. Používaný diagnostický systém k tomuto používá zkoušky přiloženým napětím. Průběh těchto zkoušek je podrobně popsán v kapitole 3.1.4. Pro ověření stavu mezizávitové izolace je využívána zkouška rázovou vlnou. Tato zkouška je prováděna přístrojem vyrobeným firmou pro vlastní potřebu, který je v praxi nazýván „rázový generátor“.

Změny v diagnostickém systému zlepšují proveditelnost samotné výrobní diagnostiky, časovou náročnost a v jistých ohledech i náročnost ekonomickou. Cena odhalené defektní cívky je v řádech tisíců korun (při započítání práce). Oprava zničeného stroje v záruční době je mnohonásobně dražší. Nedozírné ztráty však způsobí pozastavení výroby. Při hledání chyb výroby je také důležitý záznam informací o průběhu výroby. Nový diagnostický systém s novým rázovým generátorem zvýší spolehlivost a zpřehlední výrobu nových statorových cívek.

4.1 Stávající rázový generátor

Schéma hlavního obvodu rázového generátoru je zobrazeno na *obr. 4.1*. Samotný generátor je tvořen kulovým jiskřištěm, připojeným sériově na kondenzátor. Kondenzátor se nabíjí z polovodičového můstkového usměrňovače. Regulaci napětí zajišťuje autotransfornátor, jehož výstupní napětí zvyšujeme vysokonapěťovým transformátorem. Výstup z vysokonapěťového transformátoru je vyveden na zmiňovaný usměrňovač. Měřená cívka je připojena mezi výstup z kulového jiskřiště a druhou svorku kondenzátoru. Postupným zvyšováním napětí na kondenzátoru vyvoláme přeskok na jiskřišti. Tento přeskok připojí nabitý kondenzátor ke zkoušené cívce a vznikne tak rázová vlna s následným kmitáním. Velikost přeskokového napětí se reguluje změnou vzdálenosti kulových elektrod. Pomocí odporového napěťového děliče snímáme napětí na cívce a signál sledujeme na osciloskopu (pro jednoduchost schématu nebylo měření zakresleno).



Obr. 4.1 Zjednodušené schéma stávajícího rázového generátoru

Ze samotného popisu mohou být patrné některé nedostatky. Problematické je již samotné generování rázové vlny. Kmitavý děj vyvolá přeskok napětí na jiskřišti. Toto jiskřiště je nezakryté. Na jiskřiště tedy působí nejrůznější vnější vlivy jako je vzdušná vlhkost, prašnost prostředí či atmosférický tlak. Mění se tak hodnota průrazného napětí a tím i napětí čela rázové vlny. Není také možné vyvolání rázové vlny v určitý čas jedním impulzem, například stisknutím tlačítka. Vždy je nutné postupně zvyšovat napětí do okamžiku přeskoku. Po takovém nastavení se začnou rázové vlny vyvolávat samy podle toho, jak rychle se bude dobíjet kondenzátor. Nemůžeme tedy mluvit o efektivním řízení rázových vln a jsme odkázáni spíše na náhodu. Změna velikosti přeskokového napětí je velmi složitá a vyžaduje velké zkušenosti obsluhy.

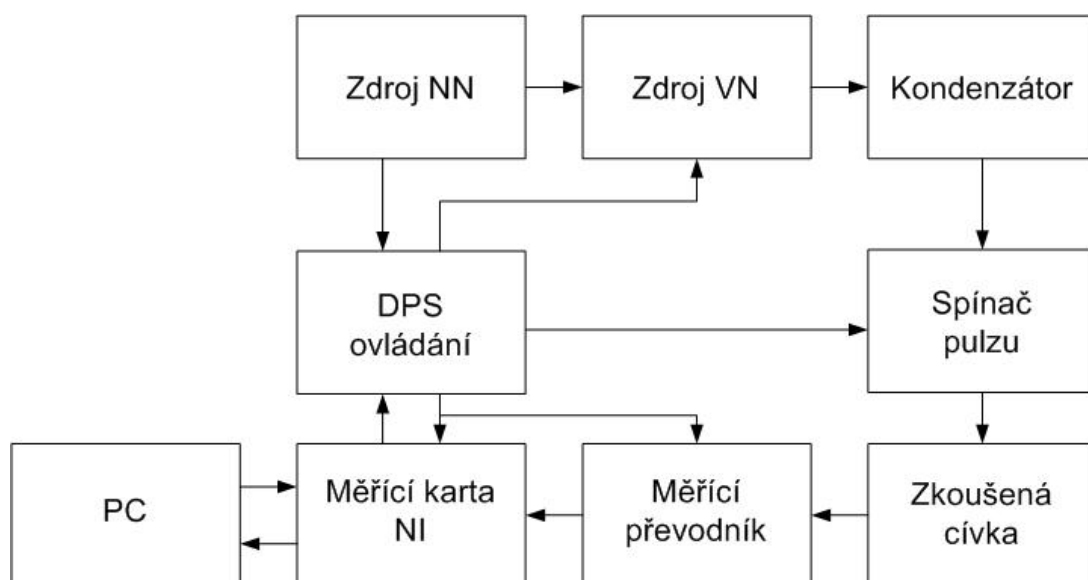
Další nevýhodou uvedeného zařízení je ve snímání průběhu kmitání. Zařízení se používá s běžným analogovým osciloskopem. Není tak možné účinné porovnání průběhů zkoušených cívek. Vyhodnocení záleží pouze na zkušenostech obsluhy. Tento problém by se dal však snadno vyřešit kvalitnějším záznamem kmitů.

4.2 Nový rázový generátor

Požadavkem na nový rázový generátor je vyšší přesnost velikosti rázové vlny, použití lepších kondenzátorů a hlavně dokonalejší vývin samotné rázové vlny. Vyhodnocení výsledku rázové zkoušky by mělo být možné použitím počítače nebo externím osciloskopem. Je tedy nutné také zvážit možnosti dnešní informační techniky pro dostatečně kvalitní záznam kmitů. Výhodná by rovněž byla možnost častého opakování měření.

4.2.1 Rázový generátor - obecně

Při návrhu nového rázového generátoru bylo nutné nejprve promyslet celkovou koncepci zařízení. Pro snadnou opravitelnost a případné úpravy za provozu, jsem celé zařízení rozdělil do jednotlivých prvků. Každý z těchto prvků byl následně vybírán, či navrhován podle zvláštních propozic. Jednotlivé prvky přístroje a jejich vzájemné vazby jsou uvedeny na *obr. 4.2*.



Obr. 4.2 Blokové schéma nového rázového generátoru

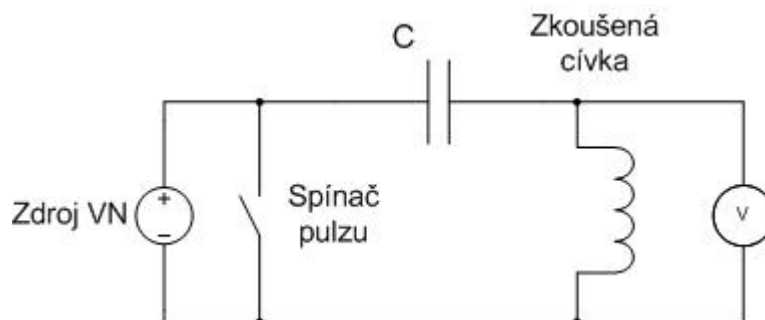
4.2.2 Zdroj pulzu

Proudový impulz vyvoláváme pomocí rychlého připojení vysokého napětí do zkoušené cívky. Pro vytvoření správného kmitavého děje je důležité mít toto vysoké napětí akumulované o dostatečně velké energii. K tomu použijeme sadu kondenzátorů dimenzované na dostatečně vysoké napětí. Kondenzátory nesmějí být elektrolytické, při kmitání totiž dochází periodicky ke změně polarity. Velikost kapacity kondenzátorů jsem zvolil podle zkušeností kolegů z praxe.

Nabíjení kondenzátorů je možné realizovat hned několika způsoby. Nejjednodušší by bylo použití vysokonapěťového transformátoru. Ruční výroba by však byla komplikovanější. Zároveň by se zvýšila hmotnost zařízení a zmenšil použitelný prostor. Další možností by bylo použití Delonova násobiče. Pro požadované napětí 8kV by však takový násobič byl příliš komplikovaný. Navíc výkony násobiče nejsou dostatečné a nabíjení velkých kondenzátorů by bylo zdoluhavé. Nejlepší volbou se nakonec ukázal předem vyrobený vysokonapěťový zdroj DCH3320 od firmy High Voltage. Zvolený zdroj je schopen plynulé elektronické regulace výstupního napětí a obsahuje nadproudovou ochranu. Výstupní napětí lze nastavovat od 0 do 10kV. Maximální velikost výstupního proudu je pak 2mA. Zdroj vyžaduje stejnosměrné napájení 24V. Pro napájení vysokonapěťového zdroje jsem zvolil opět již vyrobený průmyslový zdroj označený ve schématu jako nízkonapěťový zdroj. Kromě zmiňované hladiny 24V, disponuje též výstupem 5 V a symetrickým výstupem +/- 15V. Zbylé napěťové hladiny využijeme pro další prvky přístroje. Velikost napětí nastavujeme manuálně nebo automaticky přes ovládací desku plošných spojů. Okamžité napětí na kondenzátorech je zobrazeno na displeji.

4.2.3 Spínač pulzu

Spínání pulzů bylo dalším důvodem pro stavbu nového rázového generátoru. Vývin pulzu starého generátoru byl výsledkem náhodného děje. Požadavkem u nového zdroje bylo doslova „na stisk tlačítka“. Nemůžeme však použít obyčejný spínač či relé. Spínané napětí je v řádech kilovoltů. Pro obyčejné relé by toto napětí bylo destruktivní. Napětí však není jediný problém. Vysoké napětí spínáme prakticky do zkratu. Spínací prvek musí tedy vydržet i poměrně velké proudy bez toho aby došlo k svaření kontaktů či jinému nevratnému poškození.



Obr. 4.3 Umístění spínače pulzu v kmitavém obvodu přístroje.

Běžně dostupné polovodiče jsou pro takové aplikace nevyhovující. Blokovací napětí je nedostatečné. Navíc se při kmitání obvodu mění polarita procházejícího proudu. Při samotném otevírání se navíc může tepelně poškodit struktura polovodiče. Takový spínací prvek by tak měl výrazně omezenou životnost.

Další možností jsou vysokonapěťová relé. Principem spínání jsou shodné s těmi běžnými. Samotné kontakty jsou však umístěny například v keramické komoře. Prostor této komory je následně vyplněn plynem, který zvyšuje přeskokové napětí mezi kontakty a pomáhá zhaset elektrický oblouk. První zkoušky byly provedeny s relé firmy Gigavac. Maximální napětí těchto relé bylo výrobcem stanoveno 25kV. Praxe však tento fakt vyvrátila. První přeskoky nastaly již při hodnotě 5kV. Požadované napětí pulzu bylo až 8kV. Bylo tedy nutné najít jiné řešení.

Vakuové trigatrony jsou součástky umožňující bezkontaktní spínání vysokého napětí a poměrně vysokých proudů. Problémem je jejich současná nedostupnost. Podobný princip je však použitý i u jiné dnes stále běžně dostupné součástky. Existují bleskové výbojky pracující s napětím v řádu kilovoltů. Tyto výbojky jsou tvořeny skleněnou trubicí. Dostupné jsou rovné či kruhové výbojky. Na koncích trubice jsou zataveny hlavní kontakty. Kolem trubice naplněné speciální směsí plynů je řídce navinut spínací nebo také zapalovací drát. Hlavní kontakty tvoří spínací kontakty. Po přivedení zapalovacího pulzu na spínací drát nastane prudká ionizace plynu uvnitř výbojky a vznikne tak výboj. Tento výboj je udržován do doby, než proud klesne na dostatečně nízkou úroveň, při které ionizace zanikne. Sepnutí pomocí bleskové výbojky se překvapivě ukázalo jako nejlepší varianta. Jsou snadno dostupné a při správné

prodlevě mezi jednotlivými pulzy dosahují vysoké životnosti.

Zdrojem zapalovacího napětí výbojky je malý transformátor. Primární obvod transformátoru je při požadované rázové vlně připojen na baterii nabitých kondenzátorů. Spojení zajišťuje tyristor, který je pro větší bezpečnost spínán optotriakem. Kondenzátory jsou nabíjeny ze sítě přes dostatečně velký odpor a jednoduchý usměrňovač. Vlivem proudové špičky v primárním obvodu transformátoru dojde k naindukování napětí na jeho sekundární straně. Toto napětí je pak přivedeno na zapalovací elektrodu výbojky. K sepnutí pulzu stačí přivést 24V na vstupní svorky optotriaku. Rázový generátor umožňuje manuální či automatické ovládání pulzu.

4.2.4 Ovládání

Vnější podněty z mechanických prvků na panelu stroje a měřicí karty jsou zpracovávány ovládací deskou plošných spojů. Součástí zadání byla také možnost měření v případě poruchy či výpadku počítače. Zařízení jsem tak navrhl pro práci v manuálním a automatickém režimu. Režimy je možno volit přepínačem. Volí se tak možnost vývinu pulzu měřicí kartou nebo ručně tlačítkem. Současně s přepínáním „spouště proudového pulzu“ se také mění prvek ovládající velikost napětí čela rázové vlny. V manuálním režimu je velikost napětí nastavována potenciometrem. Při nastaveném automatickém režimu nastavuje velikost napětí měřicí karta. Je tak možné ovlivňovat velikost napětí pomocí programu v počítači.

Samotná ovládací DPS je tvořena soustavou optočlenů, které zajišťují galvanické oddělení akčních členů od výstupů měřicí karty NI. Současně je zde upravován měřený signál z předradníku. Optočleny přes tranzistory ovládají relé pro změnu rozsahu měřícího převodníku a předávají signál do spínače pulzu. Součástí desky je také snižující měnič, s výstupním napětím 12V, napájející digitální panelový voltmetr na předním panelu přístroje.

4.2.5 Měřicí karta

Neméně důležitý byl výběr automatizačního zařízení pro přesný záznam jednotlivých kmitů. Kromě samotného záznamu je nutné celý proces řídit. Pro uživatelsky snadné ovládání se ukázalo grafické rozhraní běžného osobního počítače. Problémem však bylo rozhraní mezi tímto počítačem a naším rázovým generátorem. Po předešlých zkušenostech kolegů jsem zvolil měřicí kartu NI 6009 od National Instruments. Tato karta je ovládána programem vytvořeným v LabView, což je grafické vývojové prostředí. Samotné programování probíhá grafickým spojováním bloků a je tak velice jednoduché i pro technika bez předchozích programátorských zkušeností. Umožňuje tak snadný a rychlý zásah do programu. Výsledný program je pak čistě grafický. Ovládání jednotlivých funkcí probíhá přes bloky reprezentující jednotlivé spínače a měřicí prvky. Grafická podoba programu umožňuje snadné ovládání.

Měřicí karta je k PC připojena pomocí USB rozhraní. Komunikace jednotlivými prvky rázového generátoru, stejně jako měření probíhá přes ovládací DPS. Jako nedostatečná se ukazuje rychlost vzorkování měřených kmitů. V současné době tedy uvažujeme o výměně měřicí karty za modernější.

4.2.6 Měřicí převodník

Přesná rázová vlna a její spolehlivé ovládání ke kvalitnímu rázovému generátoru nestačí. Je totiž nutné také kvalitně změřit vzniklé kmitání napětí na měřené cívce. Možné je také měřit napětí na kondenzátoru, popřípadě měřit velikost proudu. Pro měření jsem použil hotový měřicí modul AV 100-1000 firmy LEM v kombinaci s přepínatelným děličem vlastní výroby. Modul a dělič jsem zařadil do systému jako jeden prvek – měřicí převodník. Měřicí modul převádí napěťový signál o maximální hodnotě $\pm 1500\text{V}$ na proudový signál. Modul je napájen symetrickým napětím $\pm 15\text{V}$. Rychlost převodu je dostatečná pro spolehlivé vyhodnocení stavu měřené cívky. Požadované napětí čela vlny však bylo 8kV . Jako nejjednodušší a nejúčinnější se ukázal obyčejný odporový dělič. Sestava 28 rezistorů je umístěna na desce plošných spojů. Rozložení odporů na desce je voleno tak abychom předešli průrazu substrátu. Pro omezení povrchového odporu byla deska zalita pryskyřicí. Součástí této desky jsou také relé pro volbu rozsahu a ochranné trisily. Relé jsou na desce celkem tři. Pro zvýšení spolehlivosti jsou jednotlivá relé umístěna v patičích a je tak možné libovolné

z nich v případě poruchy vyměnit. Každé relé zkratuje určitý počet rezistorů, tím se upravuje dělicí poměr děliče. Je tak možné zvýšit napětí na vstupu do měřícího modulu a zvýšit tak citlivost měření. Soustava trisilů omezuje výstupní napětí na hodnotu maximálně 1500V a ochraňuje tak vstup měřícího modulu. Změnu rozsahu zajišťuje měřicí karta NI. V Manuálním režimu je signál odebírán z nejnižšího stupně děliče.

Závěr

Úvod této práce je věnován základnímu popisu asynchronního motoru, přičemž je kladen důraz na konstrukci stroje. Stejně tak kapitola o izolačním systému asynchronního stroje slouží hlavně pro základní nastínění problematiky izolačního systému. Část věnující se diagnostice popisuje možné diagnostické metody běžně používané pro diagnostiku elektrických strojů. Účelem těchto tří kapitol je seznámit i čtenáře neznalého elektrických strojů se základními principy. Značnou inspirací pro výběr důležitých pasáží byly mé zkušenosti z praxe.

Po úvodních kapitolách se zaměřuji na hlavní úkol této práce, na návrh samotného rázového generátoru. Předložené skutečnosti vycházejí z půl roku trvajících vývoje a zkoušení. Během této doby bylo navrženo a vyzkoušeno mnoho variant jednotlivých prvků generátoru. Zkoušky na reálných cívkách potvrdily správnou funkci vyvolávání pulzu. Přesto jsou stále části zařízení, které by bylo třeba zlepšit.

Použití bleskové výbojky přineslo značné výhody oproti vysokonapětovým relé. Samotná výbojka se však při vyšších napětových hladinách ukázala jako velmi náchylná na vnější zdroje ionizace. V praxi tak občas dojde k nechtěnému vývoji pulzu. Zlepšení v tomto směru přineslo lepší odstínění prostoru výbojky. Velkou otázkou je životnost výbojky. Výrobce udává výdrž 10 000 záblesků. Skutečnou výdrž ukáže až čas.

Také vzorkovací frekvence měřicí karty a měřícího převodníku by mohla být časem větší. Každé zvýšení pracovní frekvence měřících prvků se však promítne v jejich ceně. Při vývoji šlo spíše o ověření proveditelnosti a funkčnosti koncepce. Současně používané prvky jsou tak pro omezení ekonomické náročnosti většinou ze zásob firmy. Zařízení je však také kvůli tomu vyvinuto tak aby bylo modulární. Je tak v budoucnu možné snadno vyměnit nedostačující prvky. Zároveň je velký prostor pro zlepšení programu pro řízení automatického režimu.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a podsystémy*. 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2006. 240 s. ISBN: 80-7300-189-6
- [2] MENTLÍK, V., PIHERA, J., POLANSKÝ, R., PROSR, P., TRNKA, P. *Diagnostika elektrických zařízení*. 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2008. 440 s. ISBN: 978-80-7300-232-9
- [3] KOPYLOV, I. P.. *Stavba elektrických strojů*. 1. vyd. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1988. 688 s.
- [4] *Technika zkoušek vysokým napětím – obecné definice a požadavky na zkoušky*. ČSN IEC 60-1, ČSNI, Duben 1994, Praha.